

Etude expérimentale d'évaluation du potentiel de rafraîchissement des bâtiments à l'aide d'une centrale de traitement d'air à dessiccation et régénération solaire pour les climats semi-arides

Nabil LABED*, Patrice JOUBERT**, Michel BURLLOT**

* Université Larbi Ben m'hidi, Oum-El-Bouaghi, Algérie, ** LaSIE, Université de La Rochelle, France
Email des auteurs nabil_lab@yahoo.fr, patrice.joubert@univ-lr.fr, michel.burlot@univ-lr.fr

Résumé : Nous présentons les résultats expérimentaux réalisés sur une centrale de rafraîchissement solaire par dessiccation de taille réelle qui est implantée à l'Université de La Rochelle. Dans un premier lieu, on détaillera l'installation avec ses équipements. Nous exposerons ensuite les résultats de la caractérisation de la centrale obtenus avec différents protocoles expérimentaux. Pour les climats semi-arides, caractérisés par une température élevée et une faible humidité, nous avons réalisé plusieurs séries de mesures avec des résultats encourageants. En effet, avec une température de régénération élevée, la roue dessiccante a bien joué son rôle et a réussi à assécher d'avantage l'air créant ainsi un potentiel de rafraîchissement conséquent. Ceci a permis à la centrale de réaliser des conditions de soufflage satisfaisantes pour répondre aux exigences de confort. Ces résultats sont très promoteurs quant à la pertinence de cette technique pour ces climats austères.

Mots clés : Rafraîchissement, air humide, régénération, dessiccation, énergie solaire

1. Introduction

La climatisation en période estivale constitue l'un des grands enjeux de la politique énergétique des pays à climat chaud. Les techniques conventionnelles de rafraîchissement de l'air ont montré leurs limites principalement à cause des pics de consommation électrique engendrés par l'utilisation massive de climatiseurs. La technique du « desiccant cooling » peut constituer une alternative sérieuse particulièrement dans les régions à fort potentiel solaire. Cette solution est d'autant plus attrayante que les besoins en froid coïncident habituellement avec la disponibilité du rayonnement solaire.

Nous présentons ici les résultats d'une étude du potentiel de rafraîchissement et des performances d'une installation de « desiccant cooling » soumise à des climats chauds et semi-arides. L'installation expérimentale, basée au LaSIE (Université de La Rochelle), a déjà fait l'objet de plusieurs campagnes expérimentales [1] [2] [3]. Si pour les régions tempérées, la centrale de traitement de l'air à dessiccation et régénération solaire paraît capable de réaliser des conditions de confort suffisantes [4], la question est d'étudier expérimentalement l'applicabilité de ce type de centrale pour les climats chauds et très ensoleillés, comme celui du nord algérien [5].

2. Présentation de l'installation

2.2 La CTA à dessiccation

La centrale de traitement d'air par dessiccation et régénération solaire (CTA) a été conçue pour étudier le potentiel de rafraîchissement, l'impact des conditions climatiques sur ses performances et la validation d'un modèle numérique déjà développé [1]. La CTA, de taille réelle, est couplée en amont et en aval, à une centrale de prétraitement de l'air et à une batterie chaude électrique (21 kW) de simulation de la charge (fig. 1 & 2).

L'air aspiré (neuf ou recyclé) passe à travers la Roue Dessiccante « RD » où il est déshumidifié à enthalpie constante (① → ②) (fig.3). Sa température ayant substantiellement augmenté, l'air est ensuite refroidi par la Roue Sensible « RS » (② → ③), avant d'être humidifié. L'air est alors refroidi et son humidité augmente (③ → ④) pour arriver aux conditions de soufflage requises. L'air soufflé (point ④) subit un réchauffage dans une batterie chaude de simulation de charge (point ⑤). Il est ensuite repris avant de passer dans la deuxième partie de la centrale, pour traitement. Il subit, tout d'abord, une humidification isenthalpique dans l'humidificateur de reprise (⑤ → ⑥). Sa température ayant chuté, il refroidit l'air neuf de la première branche au travers de la RS. Il est ensuite réchauffé par la batterie chaude solaire, ou par la batterie électrique d'appoint le cas échéant, pour servir à la régénération de la RD avant d'être finalement rejeté vers l'extérieur. Pour la régulation de la CTA, un logiciel dédié offre la possibilité de piloter chaque élément de l'installation manuellement ou automatiquement.

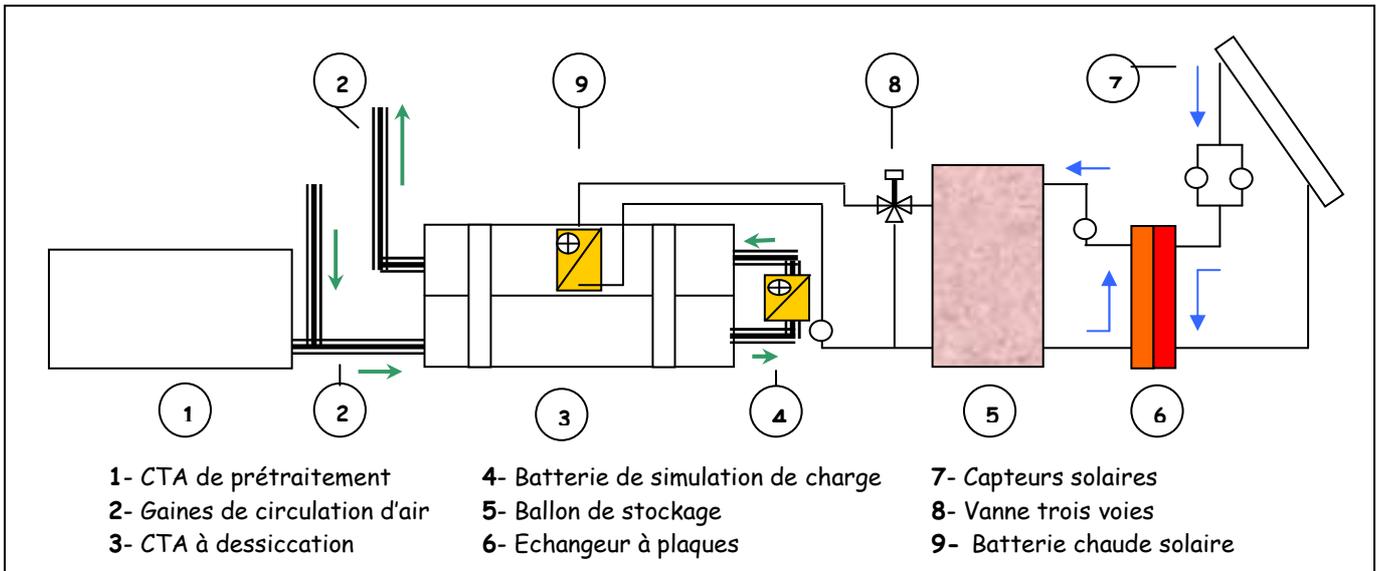


Fig. 1 : Vue d'ensemble de l'installation

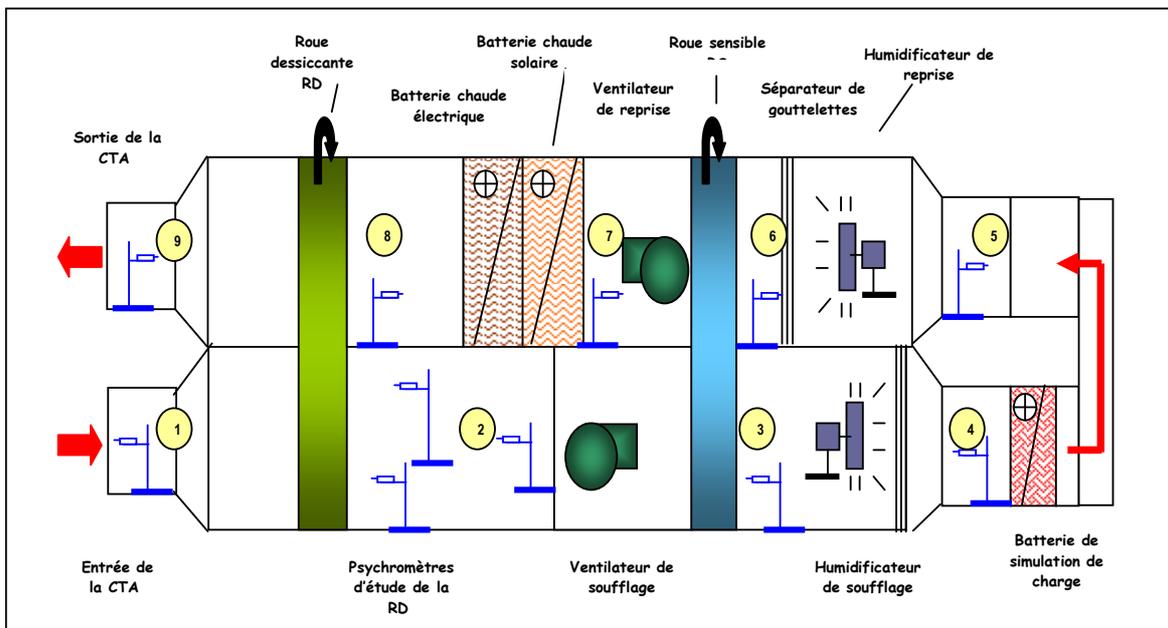


Fig. 2 : Schéma de principe de la CTA à dessiccation.

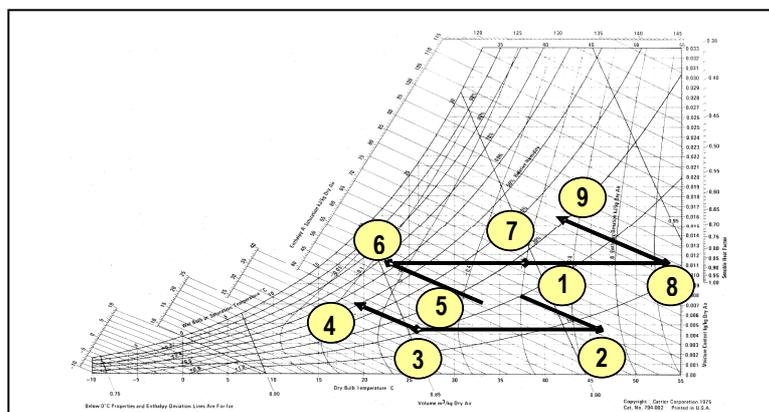


Fig. 3: Représentation des processus de traitements sur le diagramme psychrométrique

La CTA est équipée de :

- Roue dessiccante « RD » de type RC-11 au Silicagel actif, de 120 cm de diamètre et de 20 cm d'épaisseur et tournant à 7,7 tr/h.
- Roue sensible « RS » : c'est un échangeur avec une matrice poreuse en aluminium tournant à 12 tr/min.
- 2 humidificateurs à atomisation par rotation,
- Batterie chaude solaire (eau-air) d'une puissance théorique de 22,4 kW.
- batterie chaude électrique de 36 kW utilisée comme appoint pour la régénération
- 2 ventilateurs à haute performance.
- 11 psychromètres équipés de 2 sondes Pt100 pour mesurer des températures sèches et humides de l'air.
- un ensemble complet d'adoucisseur de l'eau utilisée par les humidificateurs.
- une sonde industrielle (t, ϕ) pour la mesure des conditions de reprise de l'air.

2.2 La CTA de prétraitement de l'air

Une centrale de traitement d'air classique est couplée en amont à la CTA à dessiccation. Elle permet, si les conditions extérieures ne sont pas satisfaisantes, d'obtenir des conditions climatiques requises pour l'expérimentation. Des sondes de température et d'humidité, pilotée par un PC, sont placées à la sortie de la centrale et permettent la régulation automatique de la température et de l'humidité de l'air sortant.

2.3 Le circuit solaire

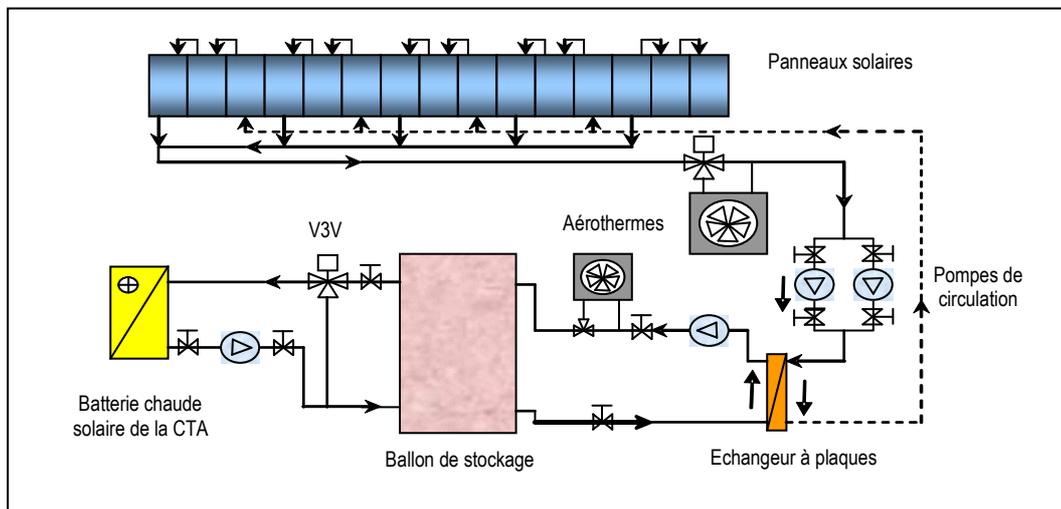


Fig. 4 : Détail du circuit solaire

Le circuit solaire est composé de deux parties distinctes (fig. 4). La première, à l'eau glycolée, est constituée d'un circuit collecteur qui comprend des capteurs solaires sous vide à caloduc et d'un échangeur intermédiaire à plaques. La seconde comprend un ballon de stockage de l'eau chaude de 2750 litres et la batterie chaude de la CTA. Les panneaux solaires placés sur la toiture, d'une surface de 40 m², sont orientés vers le sud.

La régulation du circuit solaire est assurée par 2 automates qui ont un double rôle de protection de l'installation et pour gérer au mieux le stock d'eau chaude solaire. Trois pyranomètres, montés au plus près des panneaux solaire, mesurent le flux solaire global I_G et le flux diffus I_d . Des sondes de température de type PT100 sont placées en amont et en aval de chaque élément du circuit hydraulique.

3. Caractérisation des performances de la CTA

3.1 Vérification des performances de la CTA

Nous avons commencé par la reprise des protocoles expérimentaux de Bourdoukan [1] en forçant légèrement le fonctionnement de la CTA, hors des consignes définies, afin d'en définir les caractéristiques. Il s'agit d'imposer des conditions précises à l'entrée de la RD du côté dessiccation : $\textcircled{1}(t_1, X_1)$ et du côté régénération : $\textcircled{2}(t_8, X_8)$ pour en déduire l'influence sur le potentiel de dessiccation : $\Delta X = X_1 - X_2$. Pour aller du point $\textcircled{1}$ au point $\textcircled{2}$, nous avons opté pour une humidification suivie d'un réchauffage puis une seconde humidification pour finir avec un réchauffage dans la batterie chaude électrique (36 kW).

Nos résultats montrent clairement que les performances de la CTA se sont un peu dégradées puisque le taux de dessiccation mesuré est, d'une façon générale, plus faible que celui déjà mesuré. L'écart maximal obtenu est de 2,11 g/kg_{as}. Le taux maximum mesuré est de $\Delta X = 7,09$ g/kg_{as} et le minimum est de $\Delta X = 1,16$ g/kg_{as}.

3. 2 Protocoles expérimentaux complémentaires

Pour une caractérisation plus fine de la CTA, nous avons réalisé des protocoles supplémentaires. Seuls les résultats intéressants pour cette étude sont présentés sur le tableau 1. Pour les faibles températures d'entrée (20-25°C), la perte d'humidité dans la RD se situe entre 1,58 et 6,54 g/kg_{as} suivant la régénération. La valeur maximale est de $\Delta X = 6,54$ g/kg_{as} obtenue dans le protocole X.3. Pour les températures d'air d'entrée assez élevées (35-37 °C) avec de faibles humidités, le taux de dessiccation reste relativement faible et ne dépasse pas 3,63 g/kg_{as} (protocole III.3). Si la température de régénération est trop faible, 53°C pour le protocole IV, la RD humidifie l'air au lieu de le sécher.

Tableau 1 : Résultats des protocoles complémentaires

N° du protocole	t _① °C	X _① g/kg _{as}	t _② °C	X _② g/kg _a	$\Delta X = X_{①} - X_{②}$ g/kg _{as}
III	37,35	8,24	54,55	10,23	1,12
2			55,54	14,79	0,87
3			76,18	6,28	3,63
4			74,75	10,13	3,43
5			75,10	15,01	2,87
IV	37,23	9,07	54,10	10,56	0,90
2			52,88	15,14	-0,67
3			74,64	10,24	2,96
4			75,00	15,11	1,89
VI	37,30	9,52	54,79	10,15	1,82
2			54,82	15,24	0,61
3			74,98	9,74	3,41
4			74,97	15,14	2,46
X	20,86	11,52	55,01	10,01	5,15
2			55,38	13,69	4,10
3			75,45	9,90	6,54
4			75,15	15,24	5,50
5			74,09	10,86	6,34
6			55,37	14,73	3,77

On peut dire que les essais complémentaires confirment les résultats précédents sur les capacités de la RD. Les protocoles I, III, IV et VI sont particulièrement intéressants pour notre étude. Ils montrent en particulier que la RD est capable d'assécher l'air même si son humidité est faible, et donc a priori, d'augmenter le potentiel de refroidissement par humidification. Pour de faibles humidités, il est impératif de prévoir des températures de régénération suffisamment élevées pour obtenir un taux de dessiccation raisonnable.

4. Etude de la CTA avec des conditions de climats chauds et semi-arides

Lors des campagnes de mesure, nous avons pu bénéficier de conditions idéales pour notre étude au cours du mois de septembre 2012. On dispose principalement de 3 types de résultats :

- essais courts sur une journée
- essais longs effectués avec de l'air neuf à faible humidité et à température modérées
- essais longs en air prétraité avec de bonnes conditions d'étude (37°C, 5,5 g/kg_{as})

4. 1 Essais en tout air neuf

Il s'agit d'essais effectués sur trois jours en continu avec 100% d'air neuf. Si le premier et le deuxième jour étaient intéressants (faible humidité et bon ensoleillement) le troisième était moyen. L'installation est mise en mode automatique sauf pour la V3V qui est restée volontairement fermée jusqu'au moment opportun pour le début de la régénération. Ceci est fait par souci d'optimisation de la gestion du stock en eau chaude solaire. La batterie électrique d'appoint est mise à l'arrêt. Les résultats présentés ici ont été effectués avec un débit d'air de 3200 m³/h et une charge thermique de 10,5 kW pour une consigne de reprise de l'air à 21 °C, 50%.

Le premier jour, avec un ciel clair et un bon ensoleillement, peut être considéré comme typique pour notre étude : t_{ext} = 31°C, I_{Gmax} = 975 W/m² et X_{min} = 4,70 g/kg_{as} (fig. 5 et 6). On peut remarquer sur la fig. 8 (1^{er} et 2^{ème} jour) que lorsque la régénération est active, la température de soufflage peut aller jusqu'à 15°C même avec une température de régénération relativement basse : 55-60 °C. L'humidité relative de l'air soufflé reste, par contre, toujours élevée (~80 %), ce qui peut poser des soucis de confort pour les bâtiments à fortes charges hydriques.

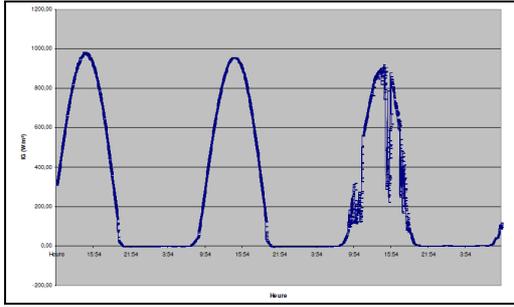


Fig. 5 : Flux global I_G reçu sur les panneaux solaires.

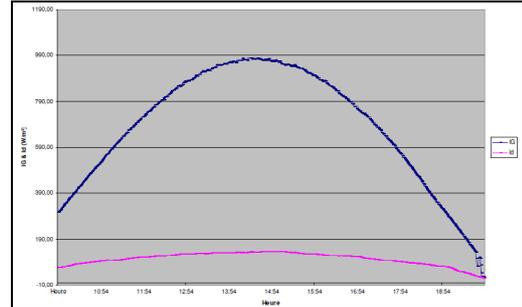


Fig. 6 : Flux solaires global I_{Get} diffus I_d (1^{ère} journée)

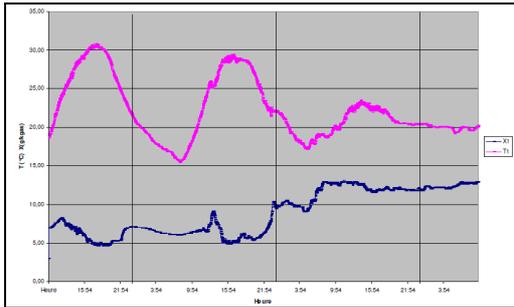


Fig. 7 : Conditions d'entrée $\textcircled{1}(t, X)$ dans la CTA.

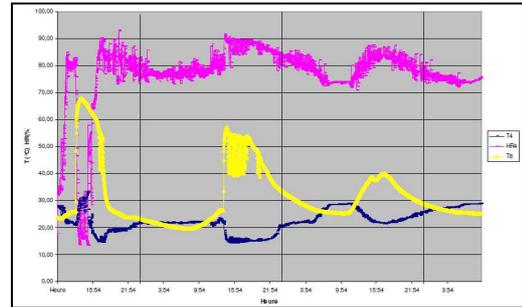


Fig. 8 : Conditions de soufflage $\textcircled{4}$ et de régénération $\textcircled{8}$

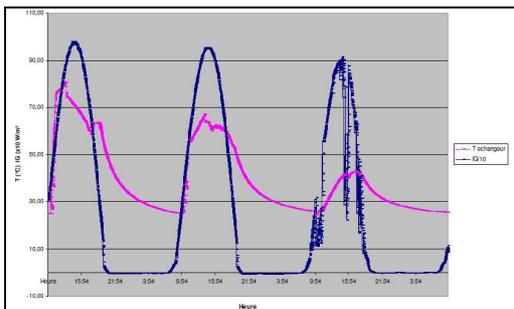


Fig. 9 : Température dans le ballon et flux global I_G .

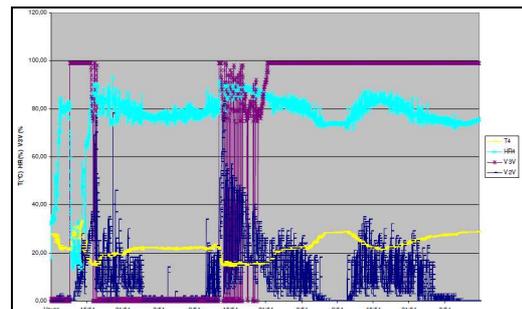


Fig. 10 : Action des vannes V3V et V2V sur le soufflage.

Pour le stock solaire, fig. 9, le premier jour, on atteint une température de 80°C dans le ballon vers 13h, avant l'ouverture de V3V et le début de la régénération. On observe une chute brutale jusqu'à 74°C avant une phase de décroissance linéaire plus douce qui se termine à 58°C vers 17h30 avec la fermeture de la V3V. Il s'en suit une légère augmentation, suivie d'une stabilisation, due à l'arrêt de la pompe de circulation. Le lendemain, on retrouve un niveau du stock à 55°C, puis un décrochage brutal de la température dès l'ouverture de la V3V.

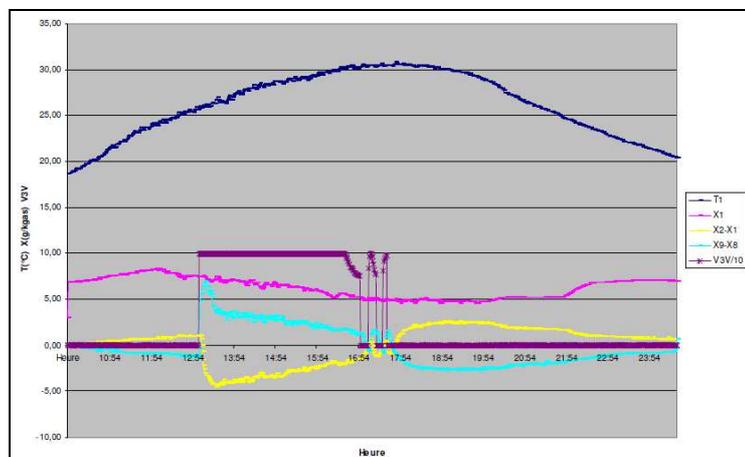


Fig. 11 : dessiccation-régénération dans la RD pendant le premier jour d'essai

Pour le deuxième jour, les conséquences du puisage dans le stock de la veille sont claires. La température

maximale atteinte dans le ballon n'est que de 67°C malgré un bon ensoleillement et une température extérieure de 31 °C. La régénération a débuté à 14h pour se poursuivre jusqu'à la fin des essais. Le dernier jour n'était pas favorable à nos mesures. Sur la fig. 10, on présente les conditions (t , ϕ) de soufflage et de reprise durant les trois jours. On remarque l'effet positif de la régénération sur les conditions de soufflage. Cet effet s'estompe cependant avec le temps du fait de la baisse de la température de régénération, le stock thermique n'ayant pas le temps de se reconstituer pendant la journée.

Sur la fig. 11, on remarque qu'au début, pour un air relativement sec ($X \sim 7\text{g/kg}_{\text{as}}$) et sans régénération, la RD humidifie l'air au lieu de le dessécher. Le processus s'inverse dès le début de la régénération. La dessiccation est importante malgré la faiblesse de l'humidité de départ. On obtient même un $\Delta X = 4,5\text{g/kg}_{\text{as}}$.

On peut estimer, à juste titre, que pour les pays à climats chauds comme l'Algérie, le potentiel solaire sera suffisant pour obtenir une température de stockage de 80°C et continuera à entretenir efficacement le stock de chaleur durant la phase de régénération. L'efficacité de la RD n'en sera que meilleure même à faible humidité. La durée de fonctionnement de la batterie solaire pourra être prolongée pour arriver à une régénération continue.

4. 2 Essais en air prétraité

La CTA de prétraitement a permis d'obtenir des températures d'air élevées et donc des conditions typiques, et même plus sévères, des climats chauds et semi-arides. Les essais ont duré deux jours en continu. Pour la régénération, la batterie solaire a été utilisée le premier jour alors que pour le jour suivant, c'est la batterie électrique qui a permis d'atteindre des températures de régénération importantes. On a essayé de mettre en évidence la variation de l'efficacité de la RD soumise à une température de régénération constante.

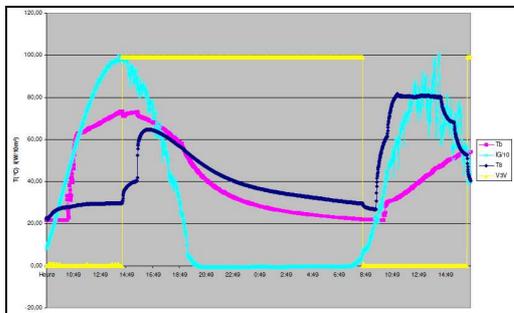


Fig. 12 : Variation de I_G et température dans le ballon.

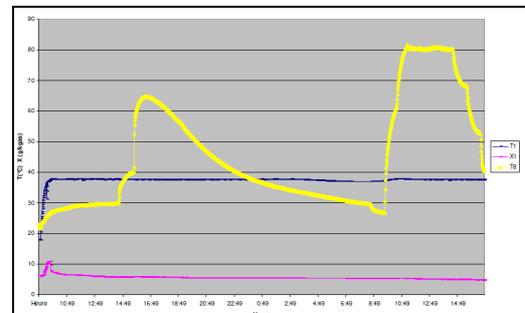


Fig. 13 : Conditions d'entrée de l'air et température de régénération

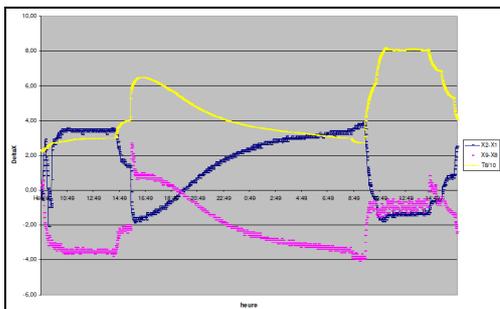


Fig. 14 : Taux de dessiccation et de régénération dans la RD

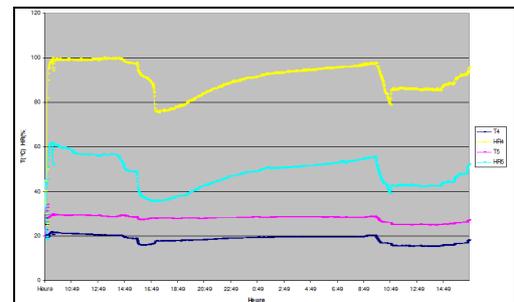


Fig. 15 : Conditions de soufflage ① et de reprise ⑤

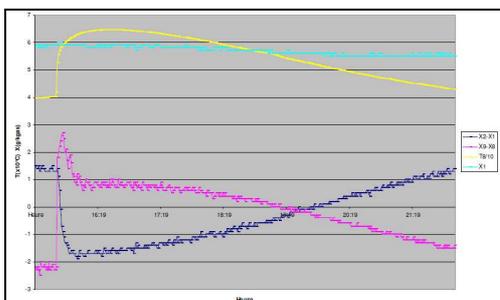


Fig. 16 : Dessiccation-régénération dans la RD. Batterie solaire.

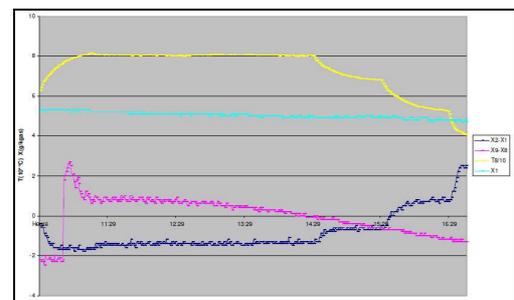


Fig. 17 : Dessiccation-régénération dans la RD. Batterie électrique

Nous avons travaillé tout au long de cette manipulation avec des conditions climatiques stables en température ($t_1=37^\circ\text{C}$) grâce à la régulation de la CTA de prétraitement. L'humidité de l'air extérieur est restée relativement faible : $X_1=4,7\sim 6,5 \text{ g/kg}_{\text{as}}$ (fig.13), ce qui constitue donc des conditions plus sévères que celles d'une journée chaude typique.

Durant le premier jour, avec un bon ensoleillement, la température dans le ballon a atteint 75°C (fig. 12). Après le début de la régénération, elle baisse modérément tant que les apports solaires sont présents. Sur la fig. 16, on distingue clairement l'allure symétrique de la dessiccation dans la RD par rapport à la température de régénération. Au début, la RD réussit à soustraire jusqu'à $1,7 \text{ g/kg}_{\text{as}}$ malgré la faible humidité de l'air d'entrée. Par la suite, et dès que la température de régénération descend jusqu'à 50°C , la dessiccation s'arrête et la RD commence à faire de l'humidification indirecte ($\Delta X < 0$).

Le deuxième jour, nous avons préféré travailler à température de régénération élevée et constante (80°C) pour simuler au mieux les conditions des climats à fort potentiel solaire. Les résultats sont présentés sur la fig. 17. On voit clairement que la dessiccation est quasi-constante dans le temps avec une valeur moyenne de $1,5 \text{ g/kg}_{\text{as}}$ malgré que l'air à l'entrée soit sec ($5 \text{ g/kg}_{\text{as}}$). Dès que la température de régénération diminue, l'effet est immédiat et pour une température $T_8 = 70^\circ\text{C}$, on obtient à peine $\Delta X=0,7 \text{ g/kg}_{\text{as}}$.

Les conditions de soufflage et de reprise, fig. 15, sont comme prévu, meilleures pour une régénération à 80°C . Nous avons ainsi obtenu des conditions de soufflage intéressantes, point④ ($15,5^\circ\text{C}$, 85%), avec un air de reprise ⑤ à (25°C , 42%) pour une charge sensible de $11,5 \text{ kW}$ pour un débit d'air de $3200 \text{ m}^3/\text{h}$.

Il est important de signaler enfin que, durant 32 h de fonctionnement, la CTA a consommé 900 litres d'eau traitée. Cette consommation importante peut constituer un handicap sérieux pour l'application de ce procédé dans des pays avec de faibles ressources en eau.

Conclusion et perspectives

Pour les conditions typiques des climats chauds et semi-arides, nous avons réalisé 3 types d'essais mais les plus concluants sont ceux réalisés en continu sur plusieurs jours consécutifs. Les résultats observés sont très encourageants. En effet, malgré la faible humidité de l'air et sa température élevée, la roue dessiccante a bien joué son rôle et a réussi à assécher encore d'avantage l'air, créant ainsi le potentiel nécessaire au refroidissement. Ceci a permis à la CTA de réaliser des conditions de soufflage satisfaisantes pour répondre aux exigences de confort. Il faut néanmoins signaler le problème de la consommation élevée de l'eau adoucie. L'installation, en fonctionnement continu, consomme une moyenne de 200 litres par 24h. Ceci peut représenter un investissement initial conséquent et des frais énergétiques supplémentaires.

Les résultats de cette étude permettent de confirmer l'intérêt de ce type d'installation pour des climats chauds et secs comme alternative crédible à des systèmes traditionnels. Le potentiel solaire permet d'assurer la disponibilité d'un stock thermique garantissant une régénération efficace de la RD. Une analyse concernant la maintenance de ces systèmes est également essentielle, surtout dans des climats difficiles, puisque les performances de l'installation dépendent grandement de la qualité des composants et de leur bon fonctionnement.

Nomenclature

BC	Batterie chaude	ϕ	Humidité relative de l'air	%
CTA	Centrale de traitement d'air	Δ	Différence	
RD	Roue dessiccante			
RS	Roue sensible	as	Air sec	
t	Température	$^\circ\text{C}$		
X	Humidité absolue de l'air	g/kg_{as}		

Références

- [1] P. Bourdoukan, Etude numérique et expérimentale destinée à l'exploitation des techniques de rafraîchissement par dessiccation avec régénération par énergie solaire. *Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 2008.*
- [2] P. Bourdoukan, E. Wurtz, P. Joubert, Experimental investigation of a solar desiccant cooling installation, *Solar Energy*, vol.83, pages 2059–2073, 2009
- [3] P. Bourdoukan, E. Wurtz, P. Joubert, Comparaison between the conventional and recirculation modes in desiccant cooling cycle and deriving critical efficiencies of components *Energy*, Vol 35, Pages 1057-1067 2010
- [4] M. Zerouali, N. Labed, Etude de faisabilité d'une installation de rafraîchissement solaire par dessiccation avec des conditions climatiques algériennes. *2^{ème} Congrès de l'Ass. Marocaine de Thermique, Casablanca, 2012.*
- [5] N. Labed, Etude expérimentale d'évaluation du potentiel de rafraîchissement des bâtiments à l'aide d'une centrale de traitement d'air à dessiccation et régénération solaire pour les climats semi-arides, *Rapport d'activité, Université de La Rochelle, 2012.*
- [6] C. Maalouf, Etude du rafraîchissement passif par dessiccation avec régénération par panneaux solaires. *Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 2006.*